Machine Translated by Google

Un perfil de absorción centrado en 78 MHz en el espectro promediado del cielo

Judd D. Bowman[1], Alan EE Rogers[2], Raúl A. Monsalve[3,1,4], Thomas J. Mozdzen[1], Nivedita Mahesh[1]

[1]Escuela de Exploración de la Tierra y el Espacio, Universidad Estatal de Arizona, Tempe, Arizona 85287, EE. UU.
[2] Observatorio Haystack, Instituto de Tecnología de Massachusetts, Westford, Massachusetts 01886, EE. UU.
[3]Centro de Astrofísica y Astronomía Espacial, Universidad de Colorado, Boulder, Colorado 80309, EE. UU.
[4]Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Alonso de Ribera 2850, Concepción, Chile

Después de que las estrellas se formaron en el Universo primitivo, se espera que su luz ultravioleta, finalmente, haya penetrado en el gas de hidrógeno primordial y haya alterado el estado de excitación de su línea hiperfina de 21 centímetros. Esta alteración haría que el gas absorbiera fotones del fondo cósmico de microondas, produciendo una distorsión espectral que debería ser observable hoy en frecuencias de radio de menos de 200 megahercios1 . Aquí informamos la detección de un perfil de absorción aplanado en el espectro de radio promediado del cielo, que está centrado en una frecuencia de 78 megahercios y tiene un ancho completo que se ajusta mejor a la mitad del máximo de 19 megahercios y una amplitud de 0,5 kelvin. El perfil es en gran medida consistente con las expectativas de la señal de 21 centímetros inducida por las primeras estrellas; sin embargo, la amplitud de mejor ajuste del perfil es más de un factor de dos mayor que las predicciones más grandes2 . Esta discrepancia sugiere que el gas primordial estaba mucho más frío de lo esperado o que la temperatura de radiación de fondo era más alta de lo esperado. Es poco probable que los fenómenos astrofísicos (como la radiación de las estrellas y los restos estelares) den cuenta de esta discrepancia; de las extensiones propuestas al modelo estándar de cosmología y física de partículas, solo el enfriamiento del gas como resultado de las interacciones entre la materia oscura y los bariones parece explicar la amplitud observada3 . El borde de baja frecuencia del perfil observado indica que las estrellas existían y habían producido un fondo de fotones Lyman-ÿ 180 millones de años después del Big Bang. El borde de alta frecuencia indica que el gas se calentó por encima de la temperatura de radiación menos de 100 millones de años después.

Se utilizaron observaciones con los instrumentos de banda baja del Experimento para detectar la firma global EoR (EDGES) a partir de agosto de 2015 para detectar el perfil de absorción. Cada uno de los dos instrumentos de banda baja consta de un receptor de radio y una antena dipolo de polarización simple que apunta al cenit. Los espectros de la temperatura del brillo del ruido del cielo de radio, promediados espacialmente sobre los grandes haces de los instrumentos, se registraron entre 50 y 100 MHz. Los espectros sin procesar se calibraron, filtraron e integraron durante cientos de horas. La medición automatizada del coeficiente de reflexión de la antena (S11) se realizó en el campo. Las ondas de ruido del amplificador de bajo ruido (LNA) y S11 se midieron en el laboratorio, junto con constantes de calibración adicionales. Los detalles de los instrumentos, la calibración, la verificación y el ajuste del modelo se describen en la sección Métodos.

En la Figura 1 resumimos la detección. Muestra el espectro observado por uno de los instrumentos y los resultados de los ajustes del modelo. La emisión de sincrotrón galáctico domina la

Machine Translated by Google

El ruido del cielo observado produce un perfil espectral de ley de potencia que cae desde ~5000 K a 50 MHz hasta ~1000 K a 100 MHz para las altas latitudes galácticas que se muestran. Ajustar y eliminar la emisión galáctica y las contribuciones ionosféricas del espectro utilizando un modelo de primer plano motivado físicamente de cinco términos (ecuación (1) en Métodos) da como resultado un residuo con raíz cuadrada media (rms) de 0.087 K. El perfil de absorción se encuentra ajustando el espectro integrado con el modelo de primer plano y un modelo para la señal de 21 cm simultaneamente. El modelo de 21 cm que mejor se ajusta produce un perfil de absorción simétrico en forma de U que está centrado en una frecuencia de 78±1 MHz y tiene un ancho completo a la mitad del máximo de 19ÿ2^{+4} MHz, una amplitud de 0,5ÿ0,2 $^{+0.5}$ K y un factor de aplanamiento de = 7ÿ3 $^{+5}$ (donde el los límites proporcionan intervalos de confianza del 99 % que incluyen estimaciones de incertidumbres sistemáticas; ver Métodos para la definición del modelo). Las incertidumbres en los parámetros del perfil ajustado se estiman a partir de la incertidumbre estadística en los ajustes del modelo y de las diferencias sistemáticas entre los diversos ensayos de validación que se realizaron utilizando observaciones de ambos instrumentos y varios cortes de datos diferentes. Los intervalos de confianza del 99 % que informamos se calculan como los límites exteriores de (1) la confianza estadística marginada del 99 % intervalos de ajustes al conjunto de datos primario y (2) el rango de valores de mejor ajuste para cada parámetro a través de los ensayos de validación. El ajuste con los modelos de primer plano y de 21 cm reduce los residuos a un rms de 0,025 K. El ajuste que se muestra en la Figura 1 tiene una relación señal-ruido de 37, calculada como la amplitud del perfil que mejor se ajusta dividida por la estadística incertidumbre del ajuste de amplitud, incluida la covarianza entre los parámetros del modelo. Los análisis adicionales de las observaciones que utilizan bandas espectrales restringidas producen perfiles de absorción de mejor ajuste casi idénticos con la SNR más alta que llega a 52. En la figura 2 mostramos casos representativos de estos ataques.

Realizamos numerosas pruebas de hardware y procesamiento para validar la detección. el 21 El perfil de absorción de cm se observa en datos que abarcan casi dos años y se puede extraer en todas las horas solares locales y en todas las horas siderales locales (LST). El perfil de absorción es detectado por los dos instrumentos de diseño idéntico operados en el mismo sitio y ubicados a 150 metros de distancia. Se detecta con varias modificaciones de hardware a los instrumentos, incluidas las orientaciones ortogonales de una de las antenas. Se obtienen resultados similares para el perfil de absorción con dos tuberías de procesamiento independientes. Las tuberías han sido probadas con datos simulados. El perfil se detecta usando datos procesados con dos técnicas de calibración diferentes, usando soluciones de calibración de varias mediciones de laboratorio de los receptores y usando múltiples mediciones in situ de los coeficientes de reflexión de la antena. Se modeló la sensibilidad de la detección a varios posibles errores de calibración y, en todos los casos, las amplitudes de perfil recuperadas están dentro del rango de confianza informado, como se resume en la Tabla 1. Un instrumento de banda alta EDGES opera entre 90 y 200 MHz en el mismo sitio usando un receptor casi idéntico y una versión escalada de las antenas de banda baja. No produce una característica similar en la escala

frecuencias4 . El análisis de la interferencia de radiofrecuencia (RFI) en las observaciones, incluso en la banda de radio FM, muestra que el perfil de absorción es inconsistente con el típico contribuciones espectrales de estas fuentes.

No conocemos mecanismos astronómicos o atmosféricos alternativos capaces de producir el perfil observado. Las regiones HII de la galaxia tienen una profundidad óptica creciente con la longitud de onda, bloqueando más emisiones de fondo a frecuencias más bajas, pero se observan principalmente a lo largo del plano galáctico y generan perfiles espectrales monotónicos en las frecuencias observadas. Líneas de recombinación de radio en el plano galáctico crean un piquete

Machine Translated by Google

cerca de líneas de absorción estrechas separadas por aproximadamente 0,5 MHz en el observado frecuencias [5] pero son fáciles de identificar y filtrar en las observaciones de EDGES. La ionosfera de la Tierra absorbe débilmente señales de radio en las frecuencias observadas y emite radiación térmica de electrones calientes, pero los modelos y las observaciones muestran un efecto de banda ancha que varía según las condiciones de la ionosfera 6, 7, incluidos los cambios diurnos en el contenido total de electrones. Este efecto se ajusta a nuestro modelo de primer plano. Las moléculas del radical hidroxilo y el óxido nítrico tienen líneas espectrales en la banda observada y están presentes en la atmósfera, pero las densidades y la fuerza de las líneas son demasiado bajas para producir una absorción significativa.

La línea de 21 cm tiene una frecuencia de cuadro en reposo de 1420 MHz. La expansión del universo desplaza la línea hacia el rojo hasta la banda observada de acuerdo con ÿ = 1420 / (1+z) MHz, donde z es el desplazamiento hacia el rojo y corresponde únicamente a la edad del Universo. El perfil de absorción observado es la superposición continua de líneas de gas a lo largo del rango de corrimiento al rojo observado y el volumen cosmológico, por lo tanto, la forma del perfil traza la historia del gas a lo largo del tiempo cósmico y no es el resultado de las propiedades de una nube individual. El perfil de absorción observado se centra en zÿ17 y abarca aproximadamente 20>z>15.

La intensidad de la señal observable de 21 cm del Universo temprano se da como una temperatura de brillo diferencial en relación con el fondo de microondas de acuerdo con [8] :

21( ) ÿ 0.023 ( ) [(0.15 ÿ) (1+ 10)] 1/2 (ÿ ÿ 0.02) [1 ÿ ( )/( )] k, (1)

donde xHI es la fracción neutra de hidrógeno, ÿM y ÿb son la materia y la densidad bariónica en relación con la densidad crítica, respectivamente, *h* es la constante de Hubble relativa a 100 km/s/Mpc, *TR* es la temperatura de radiación de fondo, que generalmente se supone que proviene del fondo producido por el resplandor del Big Bang, *TS* es la temperatura de giro de 21 cm que define la población relativa de los niveles de energía hiperfina, y el factor de 0,023 K proviene de la física de líneas atómicas y la densidad promedio del gas. La temperatura de espín se ve afectada por la absorción de fotones de microondas, que acoplan *TS* a *TR,* así como por la dispersión resonante de fotones Lyman-ÿ y colisiones atómicas, que acoplan *TS* a la temperatura cinética del gas, *TG.*

Las temperaturas del gas y de la radiación de fondo están acopladas en el Universo primitivo a través de la dispersión de Compton. Este acoplamiento se vuelve ineficaz en los modelos numéricos [3] 9, 10 z~150, después de lo cual el gas primordial se enfría adiabáticamente. En ausencia de estrellas o física no estándar, se espera que la temperatura del gas sea de 9,3 K en z=20 cayendo a 5,4 K en z=15. La temperatura de radiación se enfría más lentamente debido a la expansión cosmológica que sigue a T0 (1+z), con T0=2,725, y alcanza 57,2 K y 43,6 K con los mismos corrimientos al rojo, respectivamente.

Con el tiempo, los fotones Lyman-ÿ de las primeras estrellas vuelven a acoplar las temperaturas del [11] , espín y del gas que conducen a la señal detectada. El inicio z=20 del perfil de absorción observado sitúa esta época en una edad de 180 millones de años, utilizando los parámetros cosmológicos de Planck 2015

Machine Translated by Google

[12] . Para el caso más extremo, en el que *TS* está totalmente acoplado a *TG,* el modelo estándar produce una amplitud de absorción máxima de 0,20 K en z=20 aumentando a 0,23 K en z=15.

La presencia de estrellas eventualmente debería detener el enfriamiento del gas y finalmente calentarlo. porque la radiación estelar deposita energía en el gas y el enfriamiento de la línea Lyman ha sido modelado para que sea muy pequeño para las propiedades estelares esperadas[13] . A medida que mueren las primeras estrellas, se espera que dejen restos estelares, como agujeros negros y estrellas de neutrones. Los discos de acreción alrededor de estos restos deberían generar rayos X, calentando aún más el gas. En algún momento, se espera que el gas se caliente más que la temperatura de radiación de fondo, poniendo fin a la señal de absorción. El borde z=15 del perfil observado ubica esta transición alrededor de 270 millones de años después del Big Bang.

Las edades derivadas de los eventos anteriores caen dentro del rango esperado en muchos teóricos modelos[2] . Sin embargo, la forma aplanada del perfil de absorción observado es poco común en los modelos existentes y podría indicar que el flujo inicial de radiación Lyman-ÿ de las primeras estrellas fue lo suficientemente grande como para saturar rápidamente la temperatura de espín a la temperatura del gas. Los modelos de flujo alto de Lyman-ÿ se probaron en z<14 usando mediciones de banda alta de EDGES y se encontró que una gran fracción era inconsistente con los datos[4] .

Para producir la amplitud de perfil de mejor ajuste de 0,5 K, la relación TR/TS en el centro del perfil debe ser superior a 15, en comparación con 7 en el escenario estándar. Incluso el límite de confianza inferior de 0,3 K para la amplitud del perfil observado es ~50 % más grande que la señal predicha más fuerte. Para un historial de temperatura de gas estándar, *TR* necesitaría ser mayor que 104 K para producir la amplitud de mejor ajuste en el centro del perfil, mientras que para un historial de temperatura de radiación dado únicamente por el fondo de microondas, *TG* tendría que ser menor que 3,2 k

La amplitud del perfil observado podría explicarse si el gas y la radiación de fondo las temperaturas se desacoplan en z~250 en lugar de z~150, lo que permite que el gas comience a enfriarse adiabáticamente antes. Una fracción de ionización residual después de la formación de átomos que es más baja de lo esperado en casi un orden de magnitud conduciría a una desacoplamiento Sin embargo, la validación cruzada entre modelos numéricos y su coherencia con las observaciones de Planck sugiere que la fracción de ionización residual ya se conoce con una precisión fraccionaria de ~1 %.

Considerando escenarios más exóticos, las interacciones barión-materia oscura pueden explicar la amplitud del perfil observado al reducir la temperatura del gas si la partícula[14] de materia oscura la masa está por debajo de unos pocos GeV y la sección transversal de interacción es mayor que ~10ÿ21 cm2, como derivado en el documento complementario que[3] . Los modelos existentes de otra física no estándar, la incluye la descomposición de la materia oscura y los agujeros[15] acumulación o la evaporación del negro primordial de aniquilación y los campos magnéticos primordiales[17] , predicen un aumento de la temperatura del gas y es poco probable que tengan en cuenta la amplitud observada. Es posible que algunas de estas fuentes también puedan aumentar TR a través de mecanismos como la emisión de sincrotrón asociada con los agujeros negros primordiales o los electrones relativistas[18] resultantes de la descomposición de partículas metaestables, pero no está claro si esto podría compensar el aumento de la temperatura del gas[19]. Medidas de ARCADE-2[20] sugerir una radio isotrópica antecedentes no explicados por poblaciones de origen conocidas, pero esa interpretación no ha

Machine Translated by Google

llegó a un consenso[21] y las fuentes tendrían que estar presentes en z ~ 20 para afectar el entorno de radiación relevante para la señal observada.

Si bien hemos realizado muchas pruebas para estar seguros de que el perfil observado proviene de una absorción global del fondo de microondas por gas hidrógeno en el Universo primitivo, buscamos observaciones de confirmación de otros instrumentos. Se están realizando varios experimentos similares a EDGES. Los más cercanos a lograr el desempeño requerido para verificar el perfil incluyen LEDA[22], SCI-HI/PRIZM[23], y SARAS-2[24]. Los modelos de primer plano más sofisticados que los utilizados en este análisis pueden reducir los requisitos de rendimiento del hardware, así como conducir a una mejor recuperación del perfil, ya que los modos de bajo orden en nuestra forma de perfil ajustada están degenerados con nuestro modelo de primer plano y potencialmente bajo restricciones. La descomposición de valores singulares de conjuntos de entrenamiento construidos a partir de términos de error de instrumentos simulados y contribuciones de primer plano puede producir conjuntos de base optimizados para el ajuste del modelo. Planeamos aplicar estas prometedoras técnicas a nuestro procesamiento de datos.[25, 26]

En última instancia, la mejor medición del perfil observado puede realizarse en el espacio, donde la atmósfera y la ionosfera de la Tierra no influirán en la propagación de la señal astronómica, lo que podría reducir la carga del modelo de primer plano. el[27] la medición podría realizarse desde el lado opuesto de la Luna, en órbita o en la superficie, explotando la Luna como un escudo para bloquear las señales de radio FM y otros transmisores terrestres.

Este resultado debería impulsar los esfuerzos en curso para detectar las propiedades estadísticas de las fluctuaciones espaciales en la señal de 21 cm utilizando matrices interferométricas. Proporciona la primera evidencia directa de que existe una señal para que estos telescopios la detecten. El conjunto de época de reionización de hidrógeno (HERA)[28] comenzará a funcionar en los próximos dos años para caracterizar el espectro de potencia de las fluctuaciones de 21 cm desplazadas hacia el rojo entre 100 y 200 MHz durante la época de reionización, cuando se espera la emisión de la señal de 21 cm. HERA planea extender su banda operativa a 50 MHz durante este tiempo. Es probable que tenga suficiente sensibilidad térmica para detectar cualquier señal de espectro de potencia asociada con el perfil observado, por lo que puede ser el primero en validar la señal de absorción observada. pero obstáculos permanecen como primeros planos han demostrado ser más desafiantes para los interferómetros de lo esperado y aún no se ha demostrado una mitigación de primer plano suficiente para detectar el espectro de potencia de 21 cm por cualquiera de los arreglos actualmente en funcionamiento, incluidos LOFAR y[29] MWA.[30] La expansión de una estación de matriz de longitud de onda larga existente[31] proporcionaría la sensibilidad para buscar la detección del espectro de potencia. Cuando esté construido, el SKA Low-Frequency Aperture Array planificado (skatelescope.org) debería ser capaz de detectar el espectro de potencia asociado con el perfil de absorción y, finalmente, generar una imagen de la señal de 21 cm.

REFERENCIAS

1. Pritchard, JR & Loeb, A., Cosmología de 21 cm en el siglo XXI. *Informes de Avances en Física* **75** (8), 086901 (2012).

2. Cohen, A., Fialkov, A., Barkana, R. y Lotem, M., Trazando el espacio de parámetros de la señal global de 21 cm. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **472** (2), 1915-1931 (2017).

Machine Translated by Google

3. Barkana, R. Posible interacción entre bariones y partículas de materia oscura revelada por el primeras estrellas, *Nature,* **555,** 71 (2018).

4. Monsalve, RA, Rogers, AEE, Bowman, JD y Mozdzen, TJ, resultados de EDGES High-Band: I. Restricciones en modelos fenomenológicos para la señal global de 21 cm.
Astrofias. J. **847** (1), 64 (2017).

5. Alves, MIR *et al.,* El estudio HIPASS del plano galáctico en recombinación de radio líneas. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **450** (2), 2025-2042 (2015).

6. Rogers, AEE, Bowman, JD, Vierinen, J., Monsalve, RA y Mozdzen, T., Mediciones radiométricas de la temperatura de los electrones y la opacidad de las perturbaciones ionosféricas. *Rad. ciencia* **50** (2), 130-137 (2015).

7. Sokolowski, M. *et al.,* The Impact of the Ionosphere on Ground-based Detection of the Época global de la señal de reionización. *Astrofias. J.* **813** (1), 18 (2015).

8. Zaldarriaga, M., Furlanetto, SR & Hernquist, L., 21 Centimeter Fluctuations from Cosmic Gas at High Redshifts. *Astrofias. J.* **608** (2), 622-635 (2004).

9. Ali-Haïmoud, Y. & Hirata, CM, HyRec: un hidrógeno primordial rápido y de alta precisión y código de recombinación de helio. *física Rev. D* **83** (4), 043513 (2011).

10. Shaw, JR & Chluba, J., Estimación precisa de parámetros cosmológicos usando COSMOREC.
Lun. No. R. Astron. Soc. **415** (2), 1343-1354 (2011).

11. Furlanetto, SR, The global 21-centimeter background from high redshifts. *Lun. No. r Astron. Soc.* **371,** 867-878 (2006).

12. Planck Collaboration et al., resultados de Planck 2015 XIII. Parámetros cosmológicos. *Astron. Astrofias.* **594,** A13 (2016).

13. Chen, X. & Miralda-Escude, J., El acoplamiento de temperatura cinético de giro y la tasa de calentamiento debido a la dispersión de Lyÿ antes de la reionización: predicciones para la emisión y absorción de 21 centímetros. *Astrofias. J.* **602,** 1-11 (2004).

14. Tashiro, H., Kadota, K. & Silk, J., Efectos de la dispersión bariónica de materia oscura en señales de 21 cm desplazadas hacia el rojo. *física Rev. D* **90,** 083522 (2014).

15. Lopez-Honorez, L., Mena, O., Moliné, Á., Palomares-Ruiz, S. & Vincent, AC, The 21 cm señal y la interacción entre la aniquilación de materia oscura y los procesos astrofísicos.
JCAP **2016** (8), 004 (2016).

Machine Translated by Google

16. Tashiro, H. & Sugiyama, N., El efecto de los agujeros negros primordiales en las fluctuaciones de 21 cm. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **435** (4), 3001-3008 (2013).

17. Schleicher, DRG, Banerjee, R. & Klessen, RS, Influencia del magnetismo primordial Campos en 21 cm Emisión. *Astrofias. J.* **692** (1), 236-245 (2009).

18. Biermann, PL *et al.,* Fondos cósmicos debido a la formación de la primera generación de agujeros negros supermasivos. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **441,** 1147-1156 (2014).

19. Cline, JM & Vincent, AC, Origen cosmológico del fondo de radio anómalo. *JCAP* **2013** (2) 011 (2013).

20. Seiffert, M. *et al.,* Interpretación de la medición del brillo absoluto del cielo de The Arcade 2. *Astrofias. J.* **734** (6) (2011).

21. Vernstrom, T., Norris, RP, Scott, D. & Wall, JV, El cielo de radio extragaláctico difuso profundo a 1,75 GHz. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **447** (3), 2243-2260 (2015).

22. Bernardi, G. *et al.,* Restricciones bayesianas en la señal global de 21 cm del Cósmico Amanecer. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **461** (3), 2847-2855 (2016).

23. Voytek, TC, Natarajan, A., Jáuregui García, JM, Peterson, JB & López-Cruz, O., Probing the Dark Ages at z ~ 20: The SCI-HI 21 cm All-sky Spectrum Experiment. *Astrofias. J. Let.* **782** (1), L9 (2014).

24. Singh, S. *et al.,* Primeros resultados sobre la época de reionización de First Light con SARAS 2. *Astrofias. J. Let.* **845** (2), L12 (2017).

25. Switzer, ER & Liu, A., Borrando la variable: Descubrimiento empírico en primer plano para experimentos de espectro global de 21 cm. *Astrofias. J.* **793** (102) (2014).

26. Vedantham, HK *et al.,* Efectos cromáticos en la señal global de 21 cm del amanecer cósmico. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **437,** 1056-1069 (2014).

27. Burns, JO *et al.,* Una estrategia de observación basada en el espacio para caracterizar las primeras estrellas y galaxias utilizando el espectro global desplazado al rojo de 21 cm. *Astrofias. J.* **844** (1), 33 (2017).

28. DeBoer, DR *et al.,* Hidrógeno Época de matriz de reionización (HERA). *PASP* **129** (974), 045001 (2017).

Machine Translated by Google

29. Patil, AH *et al.,* Límites superiores en la época de 21 cm del espectro de potencia de reionización de una noche con LOFAR. *Astrofias. J.* **838** (1), 65 (2017).

30. Beardsley, AP *et al.,* Resultados del espectro de energía EoR MWA de la primera temporada en Redshift 7. *Astrofias. J.* **833** (1), 102 (2016).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a CSIRO por proporcionar la infraestructura del sitio y el acceso a las instalaciones. Agradecemos al equipo del Centro de soporte de MRO, especialmente a Michael Reay, Lou Puls, John Morris, Suzy Jackson, Brett Hiscock y Kevin Ferguson. Agradecemos a Catherine Bowman, Delani Cele, Christopher Eckert, Leroy Johnson, Morgan Goodrich, Hamdi Mani, James Traffie y Ken Wilson por sus contribuciones instrumentales. Agradecemos a Rennan Barkana por las contribuciones teóricas y a Gilbert Holder, Tanmay Vachaspati, Chris Hirata y Jens Chluba por los útiles intercambios. Damos las gracias a Colin Lonsdale, Heidi Johnson, Jacqueline Hewitt y Jack Burns. Agradecemos a Carolyn y Mark Halleen por el sitio y el apoyo logístico. Este trabajo fue apoyado por la NSF a través de los premios AST-0905990, AST-1207761 y AST 1609450. RAM reconoce el apoyo del Centro de Investigación Ames de la NASA (NNX16AF59G) y el Instituto Virtual de Investigación de Exploración del Sistema Solar de la NASA (80ARC017M0006). Este trabajo científico hace uso del Observatorio de Radioastronomía de Murchison. Reconocemos al pueblo Wajarri Yamatji como los propietarios tradicionales del sitio del Observatorio.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR

J. Bowman, R. Monsalve y A. Rogers contribuyeron a todas las actividades. N. Mahesh y T. Mozdzen modeló las propiedades del instrumento, realizó calibraciones de laboratorio y contribuyó a la preparación de este manuscrito.

Los autores no tienen intereses financieros en competencia.

La correspondencia y las solicitudes de materiales deben dirigirse a judd.bowman@asu.edu

La información sobre reimpresiones y permisos está disponible en www.nature.com/reprints

Machine Translated by Google

Tabla 1. Sensibilidad a posibles errores de calibración

Origen del error	Estimado Incertidumbre	modelado Nivel de error	Recuperado Amplitud (K)
Magnitud LNA S11	0,1 dB 20	1,0 dB 100	0.51
Fase LNA S11 (retraso)	segundos		0.48
Antena S11 magnitud	0,02 dB 20		0.50
Antena S11 fase (retardo)	segundos		0.48
Sin corrección de pérdida	N/AN/D		0.51
Sin corrección de haz		picosegundos 0,2 dB 100 picosegundos N/AN/D	0.48

Machine Translated by Google

LEYENDAS DE CUADROS Y FIGURAS

Tabla 1. Sensibilidad a posibles errores de calibración. La incertidumbre estimada para cada caso se basa en valores empíricos de mediciones de laboratorio y pruebas de repetibilidad.
Los niveles de error modelados se eligieron de forma conservadora para que fueran 5 o 10 veces mayores que los niveles de error de incertidumbre estimados.

Figura 1. Resumen de detección. El panel (a) muestra el espectro medido para el conjunto de datos de referencia después de filtrar por calidad de datos y RFI. El espectro está dominado por la emisión de sincrotrón galáctico. Los siguientes dos paneles muestran los residuos después de ajustar y quitar el modelo de primer plano solamente (b) y los modelos combinados de primer plano y de 21 cm (c), respectivamente. El panel (d) muestra el perfil del modelo de absorción de 21 cm recuperado con SNR 37, amplitud 0,53 K, frecuencia central 78,1 MHz y ancho 18,7 MHz. El panel (e) presenta el modelo de 21 cm sumado con sus residuales del panel (c).

Figura 2. Perfiles de absorción de 21 cm de mejor ajuste para cada caja de hardware. Cada perfil es sumados con sus residuos y trazados frente al corrimiento al rojo y la edad del Universo. La línea negra gruesa es el ajuste de modelo SNR = 52 más alto que resultó de cualquiera de nuestras seis configuraciones de hardware (ver Métodos) procesadas usando 60-99 MHz y un modelo de primer plano polinomial de 4 términos. Las líneas delgadas son los mejores ajustes de cada uno de los otros casos de configuración de hardware, excepto por el perfil que se extiende a z>26, que se reproduce de la Figura 1 y usó los mismos datos que el ajuste SNR=52 pero un modelo de primer plano diferente y la banda completa.

MÉTODOS

1. Instrumento

El experimento EDGES está ubicado en el Observatorio de Radioastronomía Murchison (MRO) en Australia Occidental (26.72 S, 116.61 E), que es el mismo sitio silencioso de radio utilizado por el SKA Precursor australiano,[32] Murchison Widefield Array y el SKA planificado. Matriz de apertura de baja frecuencia. Una versión anterior de EDGES colocó el primer límite inferior empírico en la duración de la reionización. EDGES consta actualmente de tres instrumentos: un instrumento de banda alta 34, 4, 35 sensible a 90-200 MHz (14>z>6)[33] y dos instrumentos de banda baja (low-1 y low-2) que operan sobre 50-100 MHz (27>z>13).

Cada instrumento produce espectros con una resolución de 6,1 kHz. En cada instrumento, la radiación del cielo es captada por una antena tipo dipolo de banda ancha que consta de dos paneles de metal rectangulares montados horizontalmente sobre un plano de tierra de metal. Las antenas dipolo compactas similares son 36, 37 utilizado en otras partes de la radioastronomía Se instala un receptor debajo del plano de tierra y se utiliza un balun para guiar la radiación desde los paneles de la antena hasta el receptor.[38] Una cubierta rodea el balun para proteger las corrientes en los tubos del balun, que son más fuertes en la base. Esto reduce la ganancia hacia el horizonte debido a las corrientes verticales.

Machine Translated by Google

Datos extendidos La Figura 1 muestra un diagrama de bloques del sistema. Un interruptor de entrada mecánico en la parte frontal del receptor permite que la antena se conecte a un analizador de red vectorial (VNA) remoto para medir con precisión la antena S11 o que se conecte a la ruta principal del receptor para medir el espectro de ruido del cielo. Al medir el espectro de ruido del cielo, un segundo interruptor mecánico conecta el LNA a la antena o a un atenuador de 26 dB que actúa como una carga o una fuente de ruido bien adaptada según el estado del interruptor eléctrico en la fuente de ruido. Esto realiza la conmutación de tres posiciones

operación necesaria[39] para proporcionar la primera etapa de procesamiento discutida a continuación. Después del LNA y el postamplificador, se utiliza otra fuente de ruido para inyectar ruido por debajo de los 45 MHz. Este acondicionamiento "fuera de banda" mejora la linealidad y el rango dinámico del convertidor de analógico a digital (ADC) necesario para la cancelación precisa del paso de banda del receptor proporcionado por la conmutación de tres posiciones. Un sistema termoeléctrico mantiene una temperatura constante en el receptor en el campo y en el laboratorio. El sistema mitiga contra RFI usando diseños y estrategias de análisis adaptadas de Deuterio Array. SARAS-2 emplea enfoques similares para el diseño de instrumentos.[40] [41] y PLOMO [42] .

El diseño del instrumento de banda baja difiere de las descripciones publicadas de la banda alta solo por: 1) La adición de un atenuador de 3 dB dentro del LNA antes del transistor PHEMT en la entrada. El atenuador mejora la adaptación de la impedancia del LNA, reduciendo así la sensibilidad a los errores de medición del LNA y los coeficientes de reflexión de la antena, especialmente los errores en la fase de reflexión, mientras añade solo una pequeña fracción de ruido en comparación con el ruido del cielo. Los valores más grandes de atenuación comenzarían a agregarse ruido significativo a 100 MHz. 2) El uso de una antena a escala que es precisamente el doble de la tamaño de la antena de banda alta. 3) El uso de un plano de tierra más grande. Cada plano de tierra de banda baja consta de un conjunto central de metal sólido de 2x2 metros rodeado por una malla metálica que se extiende a lo largo de 30x30 metros, con los cinco metros exteriores en forma de bordes perforados en forma de diente de sierra. Low-1 se operó inicialmente con un plano de tierra de 10x10 metros y luego se amplió a tamaño completo. El plano de tierra de tamaño completo de 30x30 metros reduce la cromaticidad del haz y hace el haz menos sensible a las condiciones del suelo. La figura 2 de datos extendidos muestra las antenas low 1 y low-2, la figura 3 de datos extendidos traza los coeficientes de reflexión medidos y la figura 4 de datos extendidos muestra cortes a través del modelo de patrón de haz de la antena.

2. Calibración

Implementamos calibración absoluta de extremo a extremo para los instrumentos de banda baja siguiendo las técnicas desarrolladas para la banda alta.[43, 34] El procedimiento de calibración en el laboratorio consiste en tomar espectros con el receptor conectado a referencia fuentes calientes y ambientales. cargas, así como a cables abiertos y en cortocircuito. Se emplean técnicas similares en otras mediciones de microondas 44, 45 . Se adquieren mediciones S11 utilizando un VNA para las fuentes de calibración y el LNA. La conexión de entrada a la caja del receptor proporciona el "plano de referencia" para todas las mediciones de VNA. Para corregir las pérdidas en la carga caliente utilizada en el laboratorio para la calibración, se miden los parámetros S completos del cable corto de la resistencia calentada en la carga caliente. La precisión de las mediciones del coeficiente de reflexión se mejora teniendo en cuenta la resistencia real de la carga de 50 ohmios de calibración del VNA y la inductancia añadida debido a los efectos peliculares en unos pocos mm de 47 línea de transmisión entre el plano de referencia y la carga interna[46] .

Los espectros de calibración y las medidas del coeficiente de reflexión adquiridas en el laboratorio. se utilizan para resolver los parámetros libres[34] en ecuaciones que explican los desajustes de impedancia entre el receptor y la antena, así como las ondas de ruido LNA correlacionadas y no correlacionadas. La calibración de laboratorio se realiza con la temperatura del receptor controlada a los 25 °C predeterminados, así como a 15 °C y 35 °C para evaluar la dependencia térmica de los parámetros de calibración. Datos extendidos La figura 5 muestra soluciones de parámetros de calibración para ambos receptores.

Después de la calibración en el laboratorio, se realiza una prueba midiendo el espectro de una carga pasiva de ~300 K con un desajuste de impedancia deliberado que imita aproximadamente el reflejo de la antena en magnitud y fase. Llamamos a este dispositivo un "simulador de antena artificial". El coeficiente de reflexión del simulador de antena se mide y aplica para producir espectros integrados calibrados. Datos ampliados La figura 3 muestra los coeficientes de reflexión del simulador de antena medidos. Una vez corregidos, se espera que los espectros integrados sean espectralmente planos, con una temperatura de ruido que coincida con la temperatura física de la carga pasiva. La planitud de los espectros integrados se cuantifica a través del RMS de los residuos después de eliminar un término constante. Los residuos RMS típicos son ~0,025 K en 50-100 MHz. Si se eliminan tres términos polinómicos, los residuos disminuyen a ~0,015 K y están limitados por el tiempo de integración.

Se realiza una segunda prueba de la calibración midiendo el espectro de una fuente de ruido seguido de un filtro y un cable de 10 pies que agrega aproximadamente 30 ns de retardo bidireccional. El dispositivo produce un espectro de forma similar al primer plano del cielo con una fuerza de alrededor de 10 000 K (siete veces mayor que la temperatura típica del cielo observada por EDGES) a 75 MHz y tiene un coeficiente de reflexión de -6 dB en magnitud con pendiente de fase similar al de la antena. Los residuos típicos están por debajo de 300 mK con cinco términos polinómicos eliminados y están limitados por el tiempo de integración. Suponiendo cualquier escala de residuos con potencia de entrada, esto corresponde a residuos de 45 mK a la temperatura típica del cielo observada. Esta prueba es más sensible que el simulador pasivo, especialmente a errores en las mediciones del coeficiente de reflexión ya que la señal es 33 veces más fuerte que la de la carga de ~300 K y la magnitud de la reflexión de este simulador es mayor que la del simulador pasivo y de la antena real.

Las pérdidas en el balun y las pérdidas debidas al plano de tierra finito se corrigen durante el procesamiento de datos utilizando modelos. El modelo de pérdida de balun se valida frente a mediciones de parámetros S. Los efectos del haz dependientes de la frecuencia se compensan modelando y sustrayendo la estructura espectral utilizando modelos de haz electromagnéticos (EM) y una plantilla de[35] mapa del cielo difuso. El modelo de haz nominal depende del plano finito sobre el suelo con una permitividad relativa de 3,5 y una de tierra conductividad de 2 x 10-2 S/m. La plantilla del cielo se produce extrapolando el[48] mapa del cielo de todo el radio de 408 MHz a las frecuencias observadas usando un índice espectral en temperatura[49] de brillo de -2.5 43, 35 .

3. Datos y Tratamiento

En la Figura 6 de datos ampliados se muestran ejemplos de datos sin procesar y procesados. El procesamiento de datos se produce en tres etapas principales. En la primera etapa, tres espectros sin procesar que se acumularon durante 13 segundos cada uno desde la entrada de la antena y dos de referencia interna

Las fuentes de ruido se convierten en un solo espectro parcialmente calibrado. [39] . Individuo 6.1 Los canales de kHz por encima de un umbral de potencia fijo reciben un peso cero para la RFI especial. El umbral normalmente se establece en tres veces el RMS de los residuos después de la eliminación de una constante y una pendiente en una ventana de canal espectral deslizante de 256. Asimismo, se descarta cualquier espectro parcialmente calibrado con una potencia media superior a la esperada del cielo o con grandes residuales. Se toma un promedio ponderado de muchos espectros sucesivos, normalmente durante varias horas. A los canales atípicos después de que una serie de Fourier se ajuste a todo el espectro acumulado se les asigna nuevamente un peso cero. Este segundo paso asigna peso cero a niveles más bajos de RFI y señales de RFI más amplias que el paso inicial.

En la segunda etapa de procesamiento, los espectros parcialmente calibrados se calibran completamente utilizando los parámetros de calibración del laboratorio y las mediciones de la antena S11 tomadas periódicamente en el campo. Las correcciones de cromaticidad del haz se aplican después de promediar el modelo en el mismo rango de LST que en los espectros. Luego, los espectros se corrigen para la pérdida del balun y del plano de tierra y se emiten con un suavizado típico a contenedores espectrales con una resolución de 390,6 kHz.

En la tercera etapa de procesamiento, los espectros de cada bloque LST de varias horas dentro de cada día se ajustan con un modelo de primer plano (consulte la descripción de los modelos a continuación). Se calcula un valor RMS de los residuales para cada bloque y los bloques por encima de un umbral seleccionado generalmente se descartan debido a la RFI de banda ancha, o la actividad solar en los datos diurnos, que no se detectaron en las etapas de procesamiento anteriores. Luego se toma un promedio ponderado de los bloques aceptados y se hace una solución de mínimos cuadrados ponderados utilizando un modelo de primer plano junto con el modelo que representa la señal de absorción de 21 cm. Datos extendidos La Figura 7 traza los pesos finales para cada contenedor espectral, equivalente a la ocupación RFI.

Las observaciones utilizadas para el análisis principal presentado en este trabajo son desde low-1 que abarcan el día 252 de 2016 hasta el día 94 de 2017 (configuración H2 a continuación). los datos son filtrado para retener solo los ángulos horarios galácticos locales (GHA) de 6 a 18 horas. GHA es equivalente a LST compensado por 17.75 horas.

4. Estimación de parámetros

El polinomio de primer plano utilizado para el análisis presentado en la Figura 1 tiene una motivación física, con cinco términos basados en las propiedades espectrales conocidas del espectro de sincrotrón galáctico y la ionosfera de la Tierra[6, 50]. Está dado por:

$$(ÿ)\ ÿ\quad 0\,(ÿ/ÿ\,)^{ÿ2.5} + 1\,(ÿ/ÿ\,)^{ÿ2,5}\ \log(ÿ/ÿ\,) + 2\,(ÿ/ÿ\,)^{ÿ2,5}\ [\mathrm{registro}(ÿ/ÿ\,)]^{2} + 3\,(ÿ/ÿ\,)^{ÿ4,5} + 4\,(ÿ/ÿ\,)^{ÿ2}\ . \qquad (2)$$

Aquí TF(ÿ) es la temperatura de brillo de la emisión de primer plano, ÿ es la frecuencia y los coeficientes *an* se ajustan a los datos. La función anterior es una aproximación lineal a:

$$(ÿ) = 0\,(ÿ/ÿ\,)^{ÿ2.5+\ 1+\ 2\ \log(ÿ/ÿ\,)\ ÿ\ 3(ÿ/ÿ\,)^{ÿ2}} + 4(ÿ/ÿ\,)^{ÿ2}\ , \qquad (3)$$

Machine Translated by Google

que está directamente conectado con la física del primer plano y la ionosfera. El factor de -2,5 en el primer exponente es el índice espectral de ley de potencia de primer plano típico, *b0* es un factor de escala de primer plano general, *b1* permite una corrección del índice espectral de primer plano típico (que varía ~0,1 en todo el cielo), y *b2* captura cualquier contribución de un término espectral de primer plano de orden superior 51, 52 . Las contribuciones ionosféricas están modeladas en b3 y b4, que permiten la absorción ionosférica del primer plano y la emisión de electrones calientes en la ionosfera, respectivamente. Este modelo también puede capturar parcialmente algunos efectos instrumentales, como la estructura espectral adicional de haces cromáticos o pequeños errores en la calibración.

También utilizamos un modelo polinomial más general en muchas de nuestras pruebas que nos permite explorar la recuperación de la señal con un número variable de términos polinómicos. Este modelo se da por:

(ÿ) = ÿ ÿ1 =0 ÿ ÿ2,5 , (4)

donde *N* es el número de términos y los coeficientes *an* se ajustan nuevamente a los datos. Al igual que con el modelo físico, el índice de -2,5 en el exponente facilita que el modelo coincida con el espectro de primer plano. Ambos modelos de primer plano producen resultados de perfil de absorción consistentes.

El perfil de absorción de 21 cm se modela como una forma gaussiana aplanada, dada por:

21(ÿ) = ÿ (1ÿ 1ÿ ÿ) , (5)

dónde

= 4 (ÿ ÿ 0) 2 / 2 en [ÿ en (1+ 2) ÿ] (6)

y *A* es la amplitud de absorción, ÿ0 es la frecuencia central, *w* es el ancho total a la mitad del máximo y ÿ es un factor de aplanamiento. Este modelo no es una descripción de la física que crea el perfil de absorción de 21 cm, sino que es una forma funcional adecuada para capturar el forma básica del perfil. Datos extendidos La Figura 8 muestra el modelo de perfil de mejor ajuste y los residuos del modelo de los ajustes de los dos modelos de primer plano.

Informamos los ajustes de parámetros de una búsqueda cuadriculada sobre los parámetros ÿ0, w y ÿ en el modelo de 21 cm. Para cada paso en la cuadrícula, realizamos un ajuste de mínimos cuadrados ponderados lineales, resolviendo simultáneamente los coeficientes de primer plano y la amplitud del perfil de absorción. El modelo de perfil de absorción de mejor ajuste maximiza la SNR en la búsqueda cuadriculada. La incertidumbre del ajuste de amplitud explica la covarianza entre los coeficientes de primer plano y la amplitud del perfil, así como el ruido.

El ajuste simultáneo de los modelos de primer plano y de 21 cm produce residuos que disminuyen con el tiempo de integración con una tendencia similar al ruido (1/ÿt) durante la duración de la observación, mientras que ajustar solo el modelo de primer plano produce residuos que disminuyen con el tiempo inicialmente para el primero ~ 10% de la integración y luego saturar, como se muestra en la figura 9 de datos extendidos.

También realizamos un análisis de cadena de Markov de Monte Carlo, que se muestra en la figura 10 de datos ampliados, para el caso de H2 utilizando un modelo de primer plano polinomial de 5 términos y un subconjunto de la banda que cubre 60-94 MHz. El parámetro de amplitud es más covariante con el aplanamiento. Los intervalos de confianza estadística del 99 % en los cuatro parámetros del modelo de 21 cm son: = 0,52ÿ0,18$^{+0.42}$ Ki = ÿ $_0$ 78,3ÿ0,3$^{+0.2}$ MHz, = 20,7ÿ0,7$^{+0.8}$ MHz, y = 6,5ÿ2,5$^{+5.6}$. Estos intervalos no incluyen ningún error sistemático debido a las diferencias entre las configuraciones de hardware y las pruebas de procesamiento. Cuando el parámetro de aplanamiento se fija en = 7, ÿ la incertidumbre estadística en el ajuste de amplitud del modelo de 21 cm se reduce a aproximadamente ÿ0,02 K. Datos ampliados La Tabla 1 muestra que las diversas configuraciones de hardware y pruebas de procesamiento con = 7 fijo producen rangos de parámetros de mejor ajuste amplitud: 0,37 < A < ÿ 0,67 K, 77,4 < ν_0 < 78,5 MHz y 17,0 < w < 22,8 MHz. Esta variación sistemática < ÿ probablemente se deba a los datos limitados en algunas de las configuraciones, pequeños errores de calibración, efectos de haz cromático residual y, potencialmente, a la estructura en el primer plano galáctico que aumenta cuando el plano galáctico está arriba. Para cada parámetro, tomar los límites exteriores de los rangos de confianza estadística del análisis MCMC integral H2 y las variaciones de mejor ajuste entre los ensayos de validación en la Tabla 1 ampliada produce nuestra estimación de los intervalos de confianza del 99 % que informamos en el artículo principal.

5. Pruebas de Verificación

Aquí enumeramos las pruebas que realizamos para verificar la detección. El perfil de absorción se detecta a partir de los datos obtenidos en las siguientes configuraciones de hardware:

H1. Low-1 con plano de tierra de 10x10 metros
H2. Low-1 con plano de tierra de 30x30 metros
H3. Low-1 con plano de tierra de 30x30 metros y receptor recalibrado
H4. Low-2 con orientación dipolo norte-sur
H5. Low-2 con orientación dipolo este-oeste
H6. Low-2 con orientación de dipolo este-oeste y escudo de balun retirado para verificar si hay resonancia que podría resultar de la formación de una antena de ranura en la unión entre las dos mitades del escudo.

El perfil de absorción se detecta en datos procesados con las siguientes configuraciones:

P1. Todos los casos de hardware utilizan dos canales de procesamiento independientes
P2. Todos los casos de hardware divididos en subconjuntos temporales
P3. Todos los casos de hardware con corrección de haz cromático activado/desactivado
P4. Todos los casos de hardware con correcciones de pérdida de suelo y pérdida de balun activadas/desactivadas
P5. Todos los casos de hardware calibrados con cuatro medidas diferentes de antena S11

Machine Translated by Google

P6. Todos los casos de hardware utilizan un modelo de primer plano de 4 términos (ecuación 4) en el rango de frecuencia 60-99 MHz

P7. Todos los casos de hardware utilizan un modelo de primer plano de 5 términos (ecuación 4) en el rango de frecuencia 60-99 MHz

P8. Todos los casos de hardware que utilizan el modelo de primer plano físico (ecuación 2) en el rango de frecuencia 51-99 MHz

P9. Todas las configuraciones de hardware que utilizan varias combinaciones adicionales de 4, 5 y/o Modelos de primer plano de 6 términos y rangos de frecuencia

P10. Caso H2 clasificado por LST/GHA

P11. Caso H2 clasificado por UTC

P12. Caso H2 agrupado por la temperatura del conducto enterrado como indicador de la temperatura ambiente en el receptor y la temperatura del cable que conecta el extremo frontal del receptor debajo de la antena con el extremo posterior en la caseta de control

P13. Caso H2 agrupado por el Sol por encima/por debajo del horizonte

P14. Caso H2 agrupado por Luna arriba/abajo del horizonte

P15. Case H2 con calibración de diferenciación hacia arriba/abajo de Galaxy agregada

P16. Caso H2 calibrado con soluciones low-2

P17. Caja H4 calibrada con medidas de laboratorio a 15 y 35°C

P18. Casos H2-H3 calibrados con mediciones de laboratorio que abarcan dos años

La Tabla de datos extendidos 1 enumera las propiedades de perfil de cada uno de los componentes de hardware. configuraciones con el procesamiento estándar (P6) y la Figura 2 ilustra los perfiles de mejor ajuste correspondientes. Las variaciones en la SNR de mejor ajuste entre las configuraciones se explican en gran medida por las diferencias en los tiempos de integración totales para cada configuración, excepto para H1, que estaba limitada por su rendimiento en el plano de tierra. Adquirimos la mayor cantidad de datos en la configuración H1, con aproximadamente 11 meses de observaciones, seguido de H2 con seis meses. Cada una de las otras configuraciones se operó durante 1 o 2 meses antes del análisis que se presenta aquí. Datos extendidos La Tabla 2 enumera las amplitudes de perfil para los datos agrupados por GHA para ambas canalizaciones de procesamiento.

Se realizaron las siguientes pruebas de verificación adicionales para verificar aspectos específicos del instrumento, la calibración del laboratorio y las tuberías de procesamiento, que incluyen:

- Procesamos datos simulados y recuperamos perfiles inyectados.
- Buscamos un perfil similar en las frecuencias escaladas en datos de banda alta y no encontramos ningún perfil correspondiente.
- Medimos la antena S11 de bajo-2 con el VNA conectado a su receptor con un cable corto de dos metros y encontramos resultados casi idénticos que con el cable de 100 metros utilizado en operaciones.
- Adquirimos mediciones S11 *in situ* que coincidían con las predicciones de nuestro modelo del balun bajo 2 con la terminal de antena en cortocircuito y abierta. Esto se hizo para verificar nuestro modelo para la pérdida de balun.
- Probamos el desempeño de los receptores en el laboratorio utilizando fuentes de antenas artificiales conectadas directamente a los receptores, como se describe anteriormente. • Verificamos nuestros modelos de vigas usando tres solucionadores numéricos electromagnéticos: CST, FEKO y HFSS. Aunque no se requiere un modelo de haz para detectar el perfil

Machine Translated by Google

Debido a que la antena EDGES está diseñada para ser en gran parte acromática, realizamos la verificación cruzada ya que aplicamos correcciones de haz en el análisis primario.

6. Sensibilidad a errores sistemáticos

En esta sección, discutimos con más detalle varias categorías principales de posibles errores sistemáticos y los pasos de validación que realizamos.

6.1. Efectos de haz y cielo

La cromaticidad del haz es mayor de lo que se puede explicar con los modelos EM de la antena en un plano de tierra infinito. Para ambos tamaños[53] de plano de tierra, bajó el RMS de los residuos de los datos a los ajustes del modelo EM de primer plano con un polinomial cuando el modelo
tuvo en cuenta el tamaño finito del plano de tierra e incluyó los efectos de la constante dieléctrica y la conductividad del suelo debajo del plano de tierra. Las estructuras residuales
emparejados cualitativamente.

Al comparar los solucionadores de EM para modelos de haces, encontramos que para los modelos de planos de tierra infinitos, el cambio en la ganancia absoluta del haz con la frecuencia en cada ángulo de visión (theta, phi) estaba dentro de ÿ0.006 entre los solucionadores y que los residuos después del primer plano se ajustan a los simulados. los espectros estaban dentro de un factor de dos. Para los modelos con planos de tierra finitos y propiedades reales del suelo, encontramos que la corrección de los datos de H1 usando modelos de vigas de FEKO y HFSS en modos de resolución integral resultó en valores de parámetros del modelo de 21 cm casi idénticos, aunque usando un modelo HFSS para el plano de tierra más grande en H2 dio como resultado un ajuste de SNR más bajo al perfil que un modelo FEKO, pero aún así una SNR más alta que sin corrección de haz (consulte la Tabla 1 de datos extendidos).

El instrumento low-2 se desplegó 100 metros al oeste de la cabaña de control, en comparación con los 50 metros al este de la cabaña para low-1. En la orientación de la antena de este a oeste, la respuesta nula del dipolo bajo 2 se apuntó aproximadamente a la cabina de control y el patrón de haz en el cielo se giró en comparación con el norte y el sur. La obtención de perfiles de absorción consistentes con los dos tamaños de planos de tierra low-1 (H1 vs. H2/H3) y con ambas orientaciones de antena low-2 (H4 vs. H5/H6) sugiere que los efectos del haz no son responsables del perfil, mientras que obtener los mismos resultados de ambas orientaciones de antena low-2 también desfavorece la emisión del cielo polarizado como una posible fuente del perfil. La obtención de perfiles de absorción consistentes con los instrumentos low-1 y low-2 a diferentes distancias de la cabina de control y con ambas orientaciones de antena low-2 sugiere que es poco probable que el perfil observado sea producido por reflejos del ruido del cielo de la cabina de control o otros objetos circundantes o causados por RFI de la cabaña. Nuestra comprensión de los reflejos de cabaña se valida aún más por la aparición de pequeñas ondas sinusoidales después de la eliminación de primer plano de 9 términos de los espectros de bajo 1 en GHA 20. Estas ondas son consistentes con los modelos de reflejos de cabaña y no son evidentes en otros GHA o en bajo 2 datos.

6.2. Errores de ganancia y pérdida

Machine Translated by Google

Muchos posibles errores sistemáticos instrumentales y efectos atmosféricos que potencialmente podrían imitar el perfil de absorción observado se deben a ganancias o pérdidas inexactas o no contabilizadas en la ruta de propagación dentro del instrumento o en la atmósfera terrestre.
Si están presentes, estos efectos serían proporcionales a la potencia total del ruido del cielo que ingresa al sistema. La potencia de ruido del cielo total recibida por EDGES varía en un factor de tres sobre GHA. Si el perfil de absorción observado se debiera a errores de ganancia o pérdida, se esperaría que la amplitud del perfil variara en GHA proporcional al ruido del cielo.

Probamos estos errores ajustando el perfil de absorción en observaciones agrupadas por GHA en bloques de 4 y 6 horas utilizando datos H2. La prueba se complica por el aumento de los efectos del haz cromático en los espectros cuando la potencia del ruido del cielo es grande debido a la presencia del plano galáctico en el haz de la antena. Compensamos esto aumentando el modelo de primer plano hasta seis términos polinómicos para el análisis GHA y usando el modelo de haz de antena FEKO para corregir los efectos del haz. Como es evidente en la Tabla de datos ampliados 2, las amplitudes de mejor ajuste promediadas en cada contenedor GHA son consistentes dentro de las incertidumbres informadas y no muestran una correlación sustancial con la potencia del ruido del cielo. La misma prueba realizada utilizando solo un modelo de primer plano polinomial de 4 términos produjo variaciones con GHA, al igual que las pruebas realizadas en datos de low-1 con el plano de tierra de 10x10 metros. Atribuimos el fracaso de estos dos casos a efectos de haz y posible estructura de primer plano. Otros casos probados tenían datos insuficientes para obtener resultados concluyentes, pero no mostraron correlación con la potencia total del ruido del cielo.

Las mediciones de la antena artificial descritas en la sección de calibración anterior proporcionan la verificación de la banda de paso suave del receptor después de la calibración. Dado que observamos la firma de 0,5 K para todas las condiciones de primer plano, incluidos los primeros planos bajos de ~1500 K a ~78 MHz, si el perfil observado fuera un artefacto instrumental debido a un error en la ganancia del receptor, esperaríamos ver una versión escalada del perfil con una amplitud de 0,5 K x (300 K / 1500 K) = 0,1 K, al medir la antena artificial ~300 K. En cambio, vemos una estructura de espectro suave en el nivel de ~ 0.025 K. Con la antena artificial de 10 000 K, esperaríamos ver un perfil de 3,3 K que arrojara residuos de 0,5 K después de eliminar un ajuste polinomial de cinco términos. En cambio, encontramos residuos que son inferiores a 0,3 K.

Los errores de calibración del receptor se desfavorecen como fuente del perfil observado. Tres se realizaron pruebas de verificación para investigar específicamente esta posibilidad mediante el procesamiento de datos con soluciones de parámetros de calibración inexactas. En la prueba de verificación P18, procesamos conjuntos de datos H2 y H3 utilizando cada una de las tres soluciones de calibración de receptor low-1 que se muestran en la columna izquierda de la Figura 5 de datos ampliados. El perfil observado se detectó en cada caso, lo que indica que la detección es robusta para estas pequeñas desviaciones en los parámetros de calibración durante el período de dos años que abarca el uso del receptor low-1. En segundo lugar, en la prueba de verificación P17 procesamos las observaciones H4 utilizando las soluciones de calibración derivadas de las mediciones de laboratorio adquiridas con la temperatura del receptor mantenida a 15 y 35 °C, aunque se controló a 25 °C para todas las observaciones. El perfil se recuperó incluso para estas diferencias de calibración más grandes, por lo que inferimos que la detección es robusta a las variaciones típicas mucho más pequeñas de ~0,1 °C en la temperatura del receptor alrededor de su punto de ajuste durante la operación. Como verificación final de las propiedades del receptor, en P16 calibramos el conjunto de datos H2 desde bajo-1 usando las soluciones de calibración del receptor derivadas para bajo-2. El perfil se recuperó usando un modelo polinomial de primer plano de siete términos sobre 53-99 MHz. Este

Machine Translated by Google

proporciona evidencia de que ambos receptores tienen propiedades generalmente similares y respuestas espectralmente suaves; de lo contrario, no esperaríamos que las soluciones de calibración fueran intercambiables de esta manera.

6.3. RFI y Radio FM

Se encuentra que la RFI es mínima en las mediciones de banda baja de EDGES. Descartamos la RFI de banda ancha generada localmente desde la cabaña de control y un plato ASKAP cercano (>150 metros de distancia) como la fuente del perfil debido a los perfiles consistentes observados por ambos instrumentos y ambas orientaciones de antena de bajo 2, como se señaló anteriormente. No hay transmisores de TV digital con licencia en Australia por debajo de 174 MHz (ver: www.acma.gov.au, ITU RCC 06). Hemos analizado las observaciones y descartado la banda de radio FM, que se extiende de 87,5 a 108 MHz, como la causa del borde de alta frecuencia del perfil observado. Los transmisores de FM dentro de ~ 3000 km del MRO podrían dispersarse desde aviones o meteoritos que se queman a una altitud de aproximadamente 100 km en la mesosfera. La inspección cuidadosa de los canales eliminados por nuestros algoritmos de detección de RFI y los residuos espectrales utilizando la resolución sin procesar de 6,1 kHz del instrumento, que sobremuestrea el espaciado mínimo de 50 kHz de los centros de los canales de FM, muestra que estas señales son escasas y transitorias y que, después de la eliminación, aparecen como casi cero -canales ponderados. Las señales FM mundiales más persistentes [54] reflejadas desde la Luna se han medido desde el MRO con una densidad de flujo de ~100 Jy. Encontramos evidencia de un paso brusco de ~0,05 K a 87,5 MHz en nuestros espectros agrupados cuando la Luna está por encima de los 45ÿ de elevación, que puede eliminarse usando solo datos de cuando la Luna está por debajo del horizonte.

7. Líneas moleculares atmosféricas

La absorción de la línea de óxido nitroso atmosférico se modeló utilizando la fuerza de la línea del catálogo JPL de 10-12,7 nm2 MHz a 300 K y una abundancia de 70 partes por billón. Asumimos una temperatura de ruido del cielo de 3000 K y una trayectoria de línea de visión a través de la atmósfera a una elevación de 8ÿ e integrada en un intervalo de altitud de 10 a 120 km. Encontramos hasta 0,001 mK de absorción por línea. Con aproximadamente 100 líneas individuales entre 50 y 100 MHz, estimamos de forma conservadora una contribución máxima posible de 0,1 mK.

8. Temperatura del gas y fracción de ionización residual

Para los cálculos térmicos de gas, utilizamos CosmoRec para modelar[10] la evolución de la temperatura de los electrones y fracción de ionización residual para z<3000. Verificamos la salida contra soluciones a ecuaciones para las contribuciones[55] dominantes al electrón. evolución de la temperatura de expansión adiabática y dispersión Compton. Suponemos que la temperatura del gas está en equilibrio con la temperatura de los electrones. Para determinar la fracción de ionización residual requerida para producir gas lo suficientemente frío para dar cuenta de la amplitud del perfil observado, modelamos una función de paso de ionización parcial en corrimiento al rojo. Utilizamos la fracción de ionización de CosmoRec para desplazamientos al rojo por encima de la transición y una fracción de ionización final constante por debajo de la transición. Realizamos una búsqueda en cuadrícula en el corrimiento al rojo de transición y la fracción de ionización final para identificar el corrimiento al rojo de transición más bajo para la fracción de ionización final más grande que resultó en la temperatura de gas requerida. Encontramos que una última

Machine Translated by Google

la fracción de ionización de ~3 x 10-5 alcanzada por z~500 sería suficiente para producir la temperatura de gas requerida. Esto es casi un orden de magnitud inferior a la fracción de ionización esperada de ~2 x 10-4 a edades similares de CosmoRec.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles del autor correspondiente a pedido razonable.

Disponibilidad de código

El código que respaldó los hallazgos de este estudio está disponible del autor correspondiente a pedido razonable.

REFERENCIAS (MÉTODOS)

31. Dowell, J., Taylor, GB, Schinzel, FK, Kassim, NE y Stovall, K., El estudio del cielo de baja frecuencia LWA1. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **469** (4), 4537-4550 (2017).

32. Bowman, J. & Rogers, AEE, RFI de banda VHF en áreas geográficamente remotas. *Actas del Taller de Mitigación de RFI. 29-31 de marzo de 2010. Groningen, Países Bajos* **POS,** publicado en línea en http://pos.sissa.it/cgi bin/reader/conf.cgi?confid=107, id.30 (2010).

33. Bowman, JD & Rogers, AEE, Límite Inferior de dz>0.06 para la duración del época de reionización. *Naturaleza* **468** (7325), 796-798 (2010).

34. Monsalve, RA, Rogers, AEE, Bowman, JD y Mozdzen, TJ, Calibración del receptor de banda alta EDGES para observar la firma global de 21 cm de la época de la reionización. *Astrofias. J.* **835** (1), 3 (2017).

35. Mozdzen, TJ, Bowman, JD, Monsalve, RA & Rogers, AEE, Mejorado medida del índice espectral del fondo radioeléctrico difuso entre 90 y 190 MHz. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **464** (4), 4995-5002 (2017).

36. Raghunathan, A., Shankar, NU y Subrahmanyan, R., An Octave Bandwidth Antena dipolo independiente de frecuencia. *Transacciones IEEE sobre anenas y propagación* **61** (7), 3411-3419 (2013).

37. Ellingson, SW, Antenas para la próxima generación de radiotelescopios de baja frecuencia. *Transacciones IEEE sobre antenas y propagación* **53** (8), 2480-2489 (2005).

Machine Translated by Google

38. Roberts, WK, Un nuevo balun de banda ancha. *proc. de la IRE* **45,** 1628-1631 (1957).

39. Bowman, JD, Rogers, AEE y Hewitt, JN, Hacia restricciones empíricas sobre la temperatura de brillo de 21 cm desplazada hacia el rojo global durante la época de reionización. *Astrofias. J.* **676** (1), 1 (2008).

40. Rogers, AEE, Pratap, P., Carter, JC y Diaz, MA, Técnicas de protección y mitigación de interferencias de radiofrecuencia para una búsqueda sensible de la línea de deuterio de 327 MHz. *Radio Ciencia* **40** (5), RS5S17 (2005).

41. Singh, S. *et al.,* SARAS 2: un radiómetro espectral para sondear el amanecer cósmico y la época de reionización a través de la detección de la señal global de 21 cm. Preimpresión en https://arxiv.org/abs/1710.01101 (2017).

42. Price, DC *et al.,* Diseño y caracterización del Experimento de Gran Apertura para Detectar los sistemas radiómetros de la Edad Oscura (LEDA). Preimpresión en https://arxiv.org/abs/1709.09313 (2017).

43. Rogers, AEE & Bowman, JD, Calibración absoluta de una antena de banda ancha y espectrómetro para una medición precisa de la temperatura del ruido del cielo. *Rad. ciencia* **47** (RS0K06), 9 (2012).

44. Hu, R. y Weinreb, S., Una nueva medición de parámetros de ruido de banda ancha. *Transacciones IEEE sobre teoría y técnicas de microondas* **52** (5), 1498-1507 (2004).

45. Belostotski, L., Un método de calibración para fuentes de ruido de RF y microondas. *Transacciones IEEE sobre teoría y técnicas de microondas* **59** (1), 178-187 (2011).

46. Ramo, S. & Whinnery, JR, *Fields and Waves in Modern Radio* (Wiley, Nueva York, 1953).

47. Monsalve, RA, Rogers, AEE, Mozdzen, TJ y Bowman, JD, One-Port Método Directo/Inverso para Caracterizar los Estándares de Calibración VNA. *ITMTT* **64** (8), 2631-2639 (2016).

48. Sutinjo, AT *et al.,* Caracterización de una matriz de prototipos de radioastronomía de baja frecuencia en Australia Occidental. *Trans. IEEE. Propagación de antenas* **63** (12), 5433-5442 (2015).

49. Haslam, CGT, Salter, CJ, Stoffel, H. & E., WW, A 408 MHz all-sky continuum survey. II - El atlas de mapas de contorno. *A&AS* **47,** 1, 2, 4-51, 53-142 (1982).

50. Chandrasekhar, S., *Radiative Transfer* (Courier Dover, Nueva York, 1960).

Machine Translated by Google

51. de Oliveira-Costa, A. *et al.,* Un modelo de emisión de radio galáctica difusa de 10 MHz a 100 GHz. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **388** (1), 247-260 (2008).

52. Bernardi, G., McQuinn, M. & Greenhill, LJ, Modelo de primer plano y errores de calibración de antena en la medición de la señal de ÿ21 cm promediada en el cielo en z~ 20. *Astrophys. J* **799** (1), 90 (2015).

53. Mozdzen, TJ, Bowman, JD, Monsalve, RA y Rogers, AEE, Límites en la sustracción de primer plano de los efectos de haz cromático en mediciones globales de 21 cm desplazadas hacia el rojo. *Lun. No. R. Astron. Soc.* **455** (4), 3890-3900 (2016).

54. McKinley, B. *et al.,* Observaciones de baja frecuencia de la Luna con el Murchison Matriz de campo amplio. *Astron. J.* **145** (1), 23 (2013).

55. Seager, S., Sasselov, DD y Scott, D., ¿Cómo exactamente se volvió neutral el universo? *Astrofias. J.Sup.* **128** (2), 407-430 (2000).

TÍTULOS Y LEYENDAS DE DATOS EXTENDIDOS

Datos ampliados Tabla 1. Valores de parámetros de mejor ajuste para el perfil de absorción de 21 cm para pruebas de verificación representativas. Los ajustes del modelo se realizaron mediante búsqueda en cuadrícula con ÿ=7 fijo. El tiempo de cielo es la cantidad de tiempo que pasa el receptor en el estado de cambio de antena y es el 33% del tiempo de reloj de pared. El sistema de adquisición de datos tiene un ciclo de trabajo de ~50 % y una eficiencia de la función de ventana espectral de ~50 %, lo que produce tiempos de integración efectivos que son un factor cuatro veces menor que los tiempos de cielo enumerados.

Datos extendidos Tabla 2. Amplitudes de perfil de 21 cm recuperadas para varios GHA. Cada bloque se centra en el GHA enumerado. Los intervalos de 6 horas utilizaron el ajuste del modelo de primer plano físico de 5 términos simultáneamente con la amplitud del perfil de 21 cm entre 64-94 MHz. el 4-
Los intervalos de horas utilizaron un modelo de primer plano polinomial de 6 términos que se ajustaba entre 65 y 95 MHz. Todos los datos son de la configuración de hardware H2. Las temperaturas del cielo se reportan a 78 MHz.

Datos extendidos Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de banda baja. Las imágenes insertadas muestran: (a) la barra de sintonización capacitiva que alimenta los dipolos en la parte superior del balun, (b) el conector SMA en la parte inferior de la línea de transmisión coaxial del balun donde se conecta el receptor, (c) el receptor low-1 instalado debajo de su antena con la placa de cubierta del plano de tierra removida, y (d) el interior del receptor low-1. El LNA está contenido en la caja metálica secundaria en la esquina inferior izquierda del receptor.

Datos extendidos Figura 2. Antenas de banda baja. El panel (a) muestra la antena low-1 con el plano de tierra de malla de 30x30 metros. El cuadrado interior más oscuro es la malla original de 10x10 metros. La caseta de control está a 50 metros de la antena. El panel (b) muestra una vista cercana de la antena low-2. Los dos paneles metálicos elevados forman la antena basada en dipolo y están

Machine Translated by Google

sostenido por patas de fibra de vidrio. El balun consta de dos tubos verticales de latón en el medio de la antena. El escudo del balun es la cubierta de metal del tamaño de una caja de zapatos que se encuentra alrededor de la parte inferior del balun. El receptor está debajo de la plataforma de metal blanco y no es visible.

Datos ampliados Figura 3. Coeficientes de reflexión de antena y simulador. En los paneles (a) y (b), las medidas se trazan para las cajas de hardware H2 (azul), H4 (rojo) y H6 (naranja). Las antenas tienen un diseño idéntico (excepto que H6 tiene el protector del balun retirado), pero se sintonizan manualmente durante la instalación ajustando la separación del panel y la altura de la pequeña placa de metal que conecta un panel con el conductor central de la línea de transmisión del balun en el otro. . Las medidas fueron adquiridas *in situ.* En los paneles (c) y (d), la curva roja es la fuente de ruido de antena artificial de 10 000 K y la curva azul es la carga no coincidente de 300 K.

Datos extendidos Figura 4. Modelo de haz de antena. El panel (a) muestra las secciones transversales del haz en el plano E (sólido) y el plano H (guión) de FEKO para la antena H2 y el plano de tierra sobre el suelo. Las secciones transversales se trazan en: 50 (rojo), 70 (verde) y 100 MHz (azul).
El panel (b) muestra la dependencia de la frecuencia de la ganancia en ÿ = 0° (sólido) y los puntos de 3 dB a 70 MHz en el plano E (guión) y el plano H (punto). Pequeñas ondulaciones con frecuencia se muestran en el panel (c) después de que se haya eliminado un polinomio de 5 términos de cada una de las curvas. Las observaciones simuladas con este modelo producen residuos de 0,015 K (0,001 %) en un ajuste de 5 términos en el rango de frecuencia de 52-97 MHz en GHA=10 y residuos de 0,1 K (0,002 %) en GHA=0, lo que muestra que el haz acumulativo produce menos cromaticidad que las variaciones de ~1% de los puntos individuales graficados.

Datos extendidos Figura 5. Soluciones de parámetros de calibración. Los paneles (a) a (g) muestran las soluciones de los parámetros de calibración para el receptor low-1 a su temperatura de funcionamiento fija de 25 °C. Se calibró en tres ocasiones a lo largo de dos años, poniendo entre paréntesis todas las observaciones de bajo 1 informadas. La primera calibración fue en agosto de 2015 antes de comenzar los casos H1 y H2 (sólido), la siguiente fue en mayo de 2017 antes de H3 (punto) y la final fue en septiembre de 2017 después de la conclusión de H3 (guión). Paneles (h) a (n)
muestre las soluciones para el receptor low-2 controlado a tres temperaturas diferentes: 15 °C (azul), 25 °C (negro) y 35 °C (rojo).

Datos extendidos Figura 6. Espectros sin procesar y procesados. El panel (a) muestra 13- crudo típico segundos espectros de H2 para cada uno de los estados del interruptor interno de "tres posiciones" del receptor. Los pequeños picos a la derecha del espectro de la antena son estaciones de FM. En el panel (b), el espectro se ha calibrado parcialmente *(T3-pos)* usando los tres espectros sin procesar para corregir las contribuciones de compensación y ganancia en el receptor y los cables, luego se ha calibrado completamente *(Tcal)* aplicando las soluciones de parámetros de calibración del laboratorio para da la temperatura del cielo.
El panel (c) muestra los residuos de un ajuste del espectro completamente calibrado con el modelo de primer plano físico.

Datos extendidos Figura 7. Pesos de canal normalizados. La fracción de datos integrados para cada contenedor espectral de 390,6 kHz. En el panel (a), la banda de FM provoca pesos bajos por encima de 87 MHz porque muchos canales espectrales sin procesar de 6,1 kHz en esta región se eliminan para todos los tiempos. Los pesos son casi idénticos en todas las cajas de hardware (H1-H6). Panel (b)

Machine Translated by Google

proporciona un primer plano para mostrar los pesos por debajo de la banda de FM, donde hay poca RFI para eliminar.

Datos extendidos Figura 8. Residuales al modelo de perfil de 21 cm. La curva negra muestra el modelo de perfil de 21 cm de mejor ajuste derivado de las observaciones. Las curvas sólidas azul y naranja muestran ajustes al perfil del modelo utilizando los modelos de primer plano polinomial físico y de 5 términos, respectivamente. Las líneas discontinuas muestran los residuos después de restar los ajustes del modelo. Estos residuos son similares a los que se encuentran al ajustar las observaciones usando solo un modelo de primer plano, como se muestra en el panel (b) de la Figura 1.

Datos extendidos Figura 9. RMS residual en función del tiempo de integración. Las curvas muestran el RMS residual después de eliminar un modelo de mejor ajuste en cada tiempo de integración para el conjunto de datos H2.

Datos extendidos Figura 10. Estimación de parámetros. Se muestran las distribuciones de probabilidad para el primer plano y los parámetros del modelo de 21 cm para el conjunto de datos H2. Los contornos se dibujan con niveles de probabilidad del 68 % y 95 %. Los coeficientes polinómicos de primer plano *(an)* están altamente correlacionados entre sí, mientras que los parámetros del modelo de 21 cm no están correlacionados en gran medida, excepto por la amplitud del perfil *(A)* y el aplanamiento (ÿ). Las incertidumbres sistemáticas de los casos de hardware de verificación no se representan aquí.

Machine Translated by Google

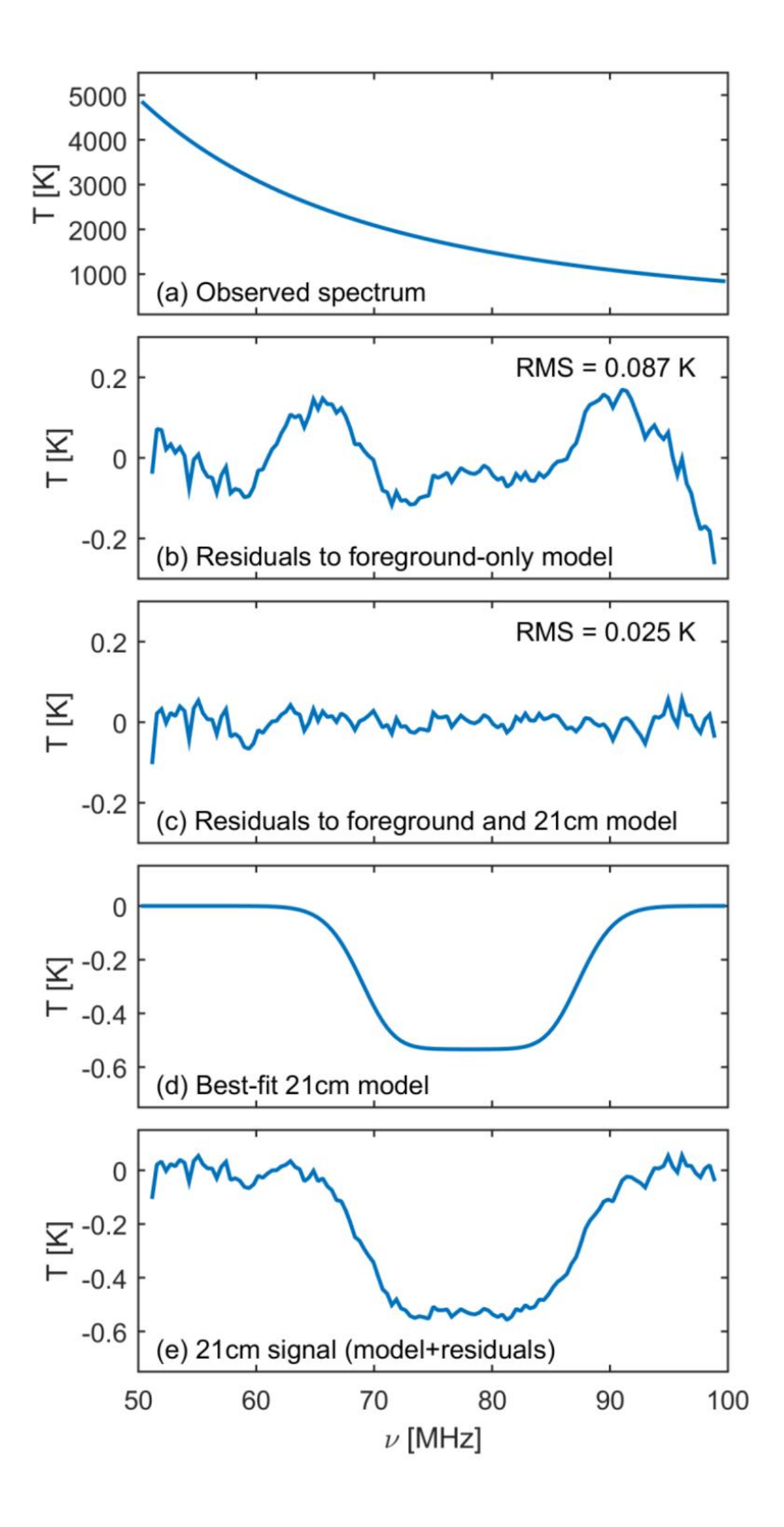


Figura 1

Machine Translated by Google

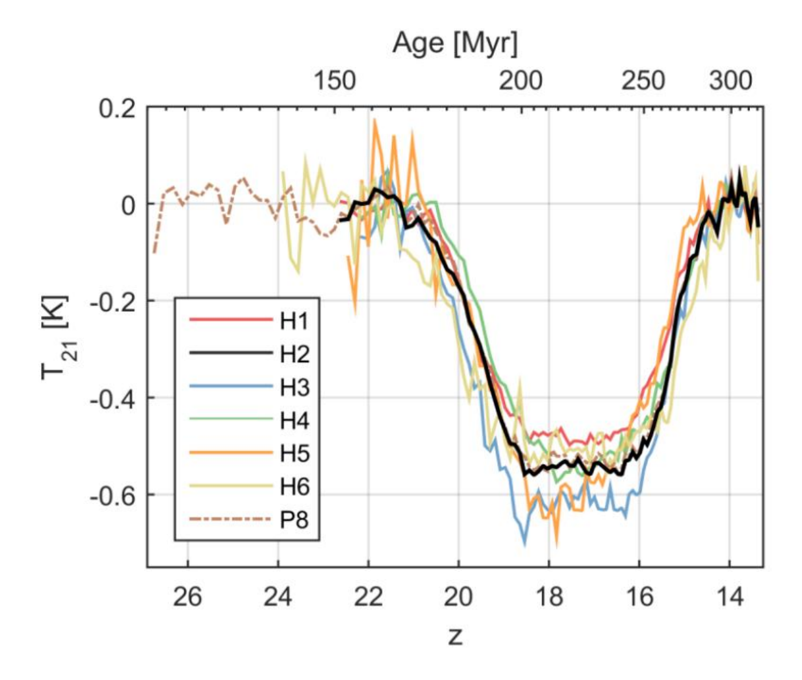


Figura 2

Machine Translated by Google

Datos ampliados Tabla 1. Valores de los parámetros de mejor ajuste para el perfil de absorción de 21 cm para pruebas de verificación representativas.

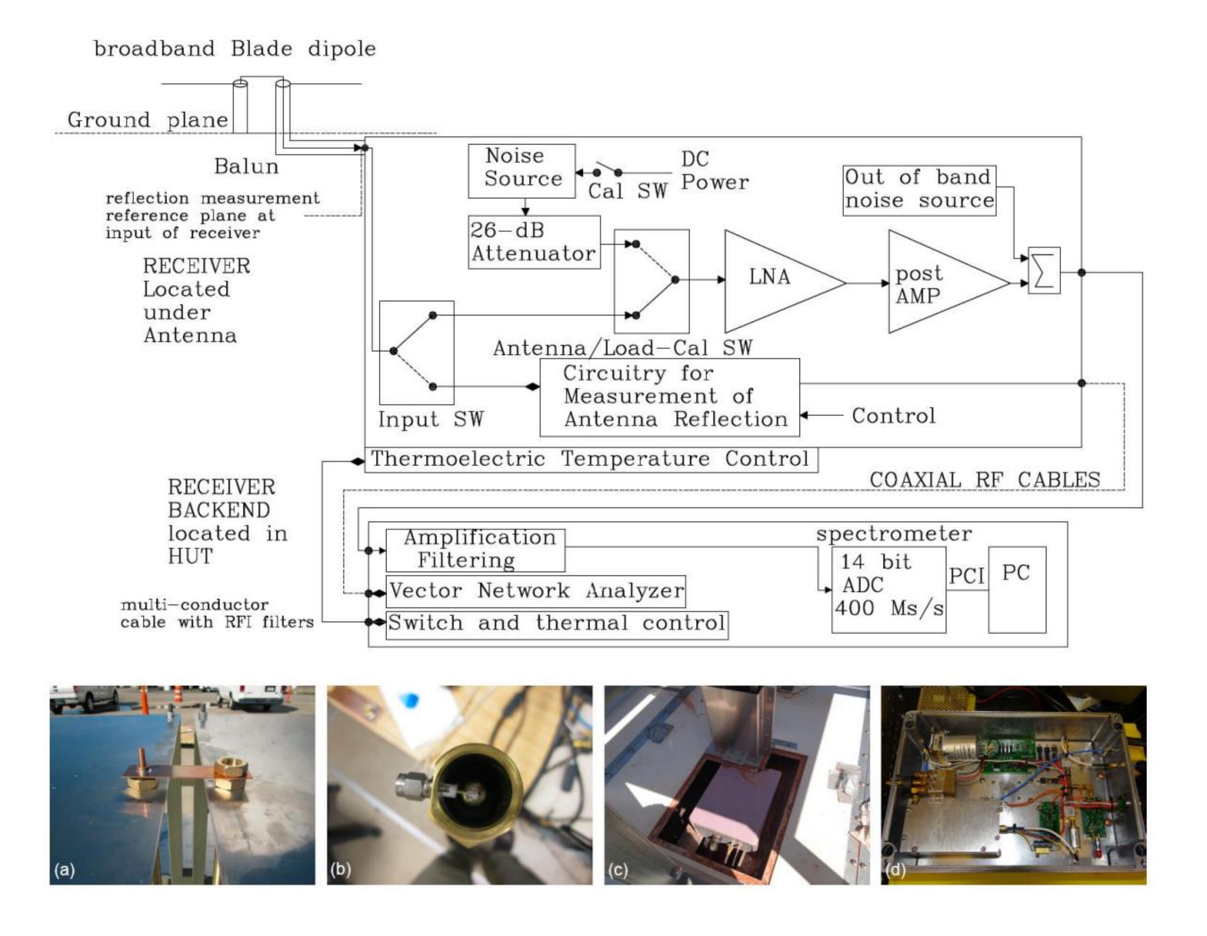
Configuración	tiempo del cielo (horas)	SNR	Centro Frecuencia (Megahercio)	Ancho (Megahercio)	Amplitud (K)
Configuraciones de hardware (todos P6)					
H1: plano de tierra bajo 1 10x10	528	30	78.1	20.4	0.48
H2 - plano de tierra bajo 1 30x30	428	52	78.1	18.8	0.54
H3 - receptor recalibrado low-1	64	13	77.4	19.3	0.43
H4 – bajo-2 NS	228	33	78.5	18.0	0.52
H5 – bajo-2 EW	68	19	77.4	17.0	0.57
H6 - low-2 EW sin escudo balun	27	15	78.1	21,9	0.50
Configuraciones de procesamiento (todo H2 excepto P17)					
P3 – Sin corrección de haz		19	78,5	20,8	0.37
Sin corrección de haz (65-95 MHz)		25	78,5	18,6	0.47
Modelo de haz HFSS		34	78,5	20,8	0,67
Modelo de viga FEKO		48	78,1	18,8	0.50
P4 – Sin correcciones de pérdida		25	77,4	18,6	0.44
P7 - Polinomio de primer plano de 5 términos (60-99 Megahercio)		21	78,1	19,2	0.47
P8: modelo de primer plano físico (51-99 MHz)		37	78,1	18,7	0.53
P14 – Luna sobre el horizonte		44	78,1	18,8	0.52
Luna debajo del horizonte		40	78,5	18,7	0.47
P17 – Calibración de 15 °C (61-99 MHz, 5 términos)		25	78,5	22,8	0,64
Calibración de 35 °C (61-99 MHz, 5 términos)		16	78,9	22,7	0.48

Machine Translated by Google

Datos extendidos Tabla 2. Amplitud de perfil de 21 cm recuperada para varios GHA

Hora galáctica Ángulo (GHA)	SNR	Amplitud (K)	Cielo La temperatura (K)
contenedores de 6 horas			
0		0,48	3999
6	8	0,57	2035
12	11	0,50	1521
18	23 15	0,60	2340
contenedores de 4 horas			
0	5	0,45	4108
4	9	0,46	2775
8	13	0,44	1480
12	21	0,57	1497
16	11	0,59	1803
20	9	0,66	3052

Machine Translated by Google



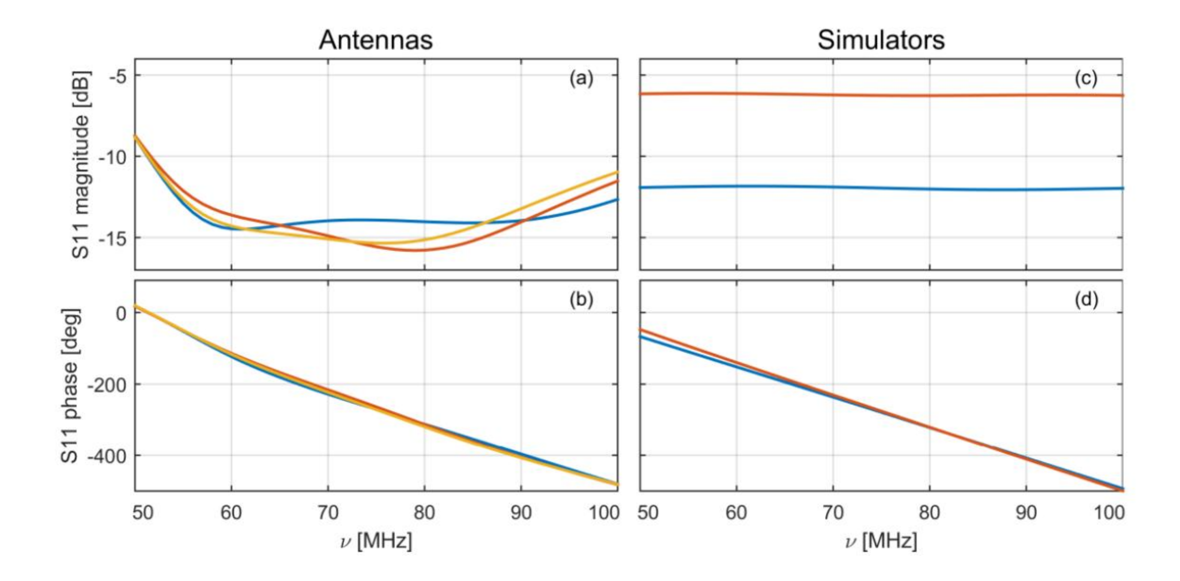
Datos extendidos Figura 1

Machine Translated by Google



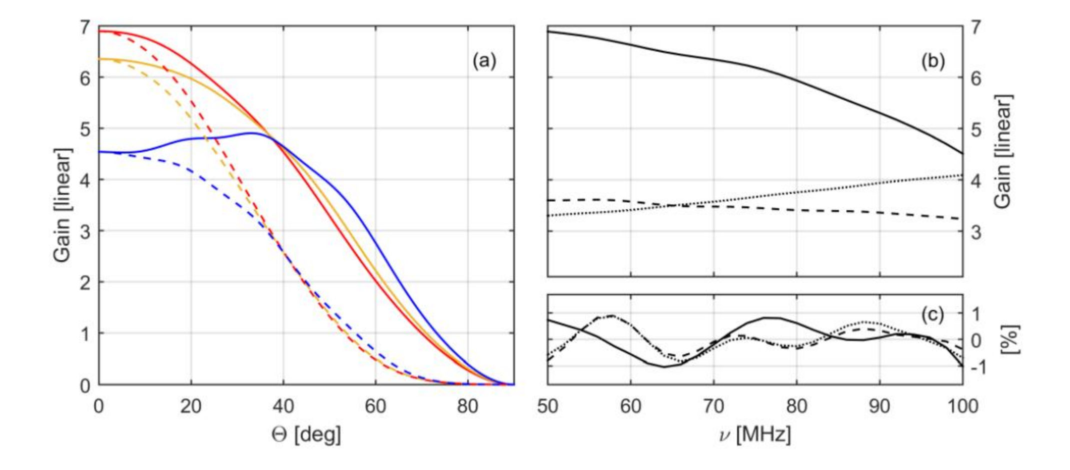
Datos extendidos Figura 2

Machine Translated by Google

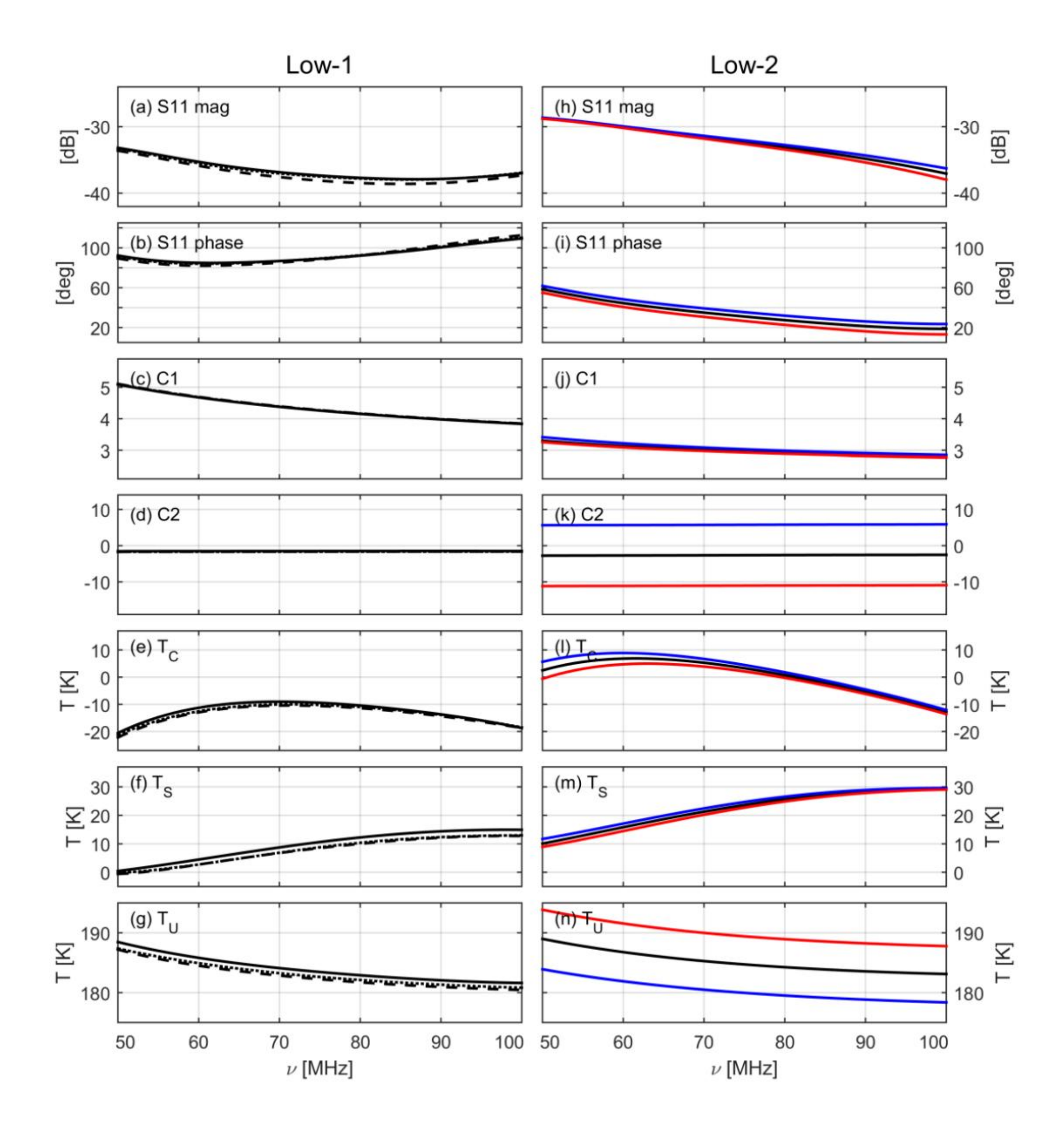


Datos extendidos Figura 3

Machine Translated by Google

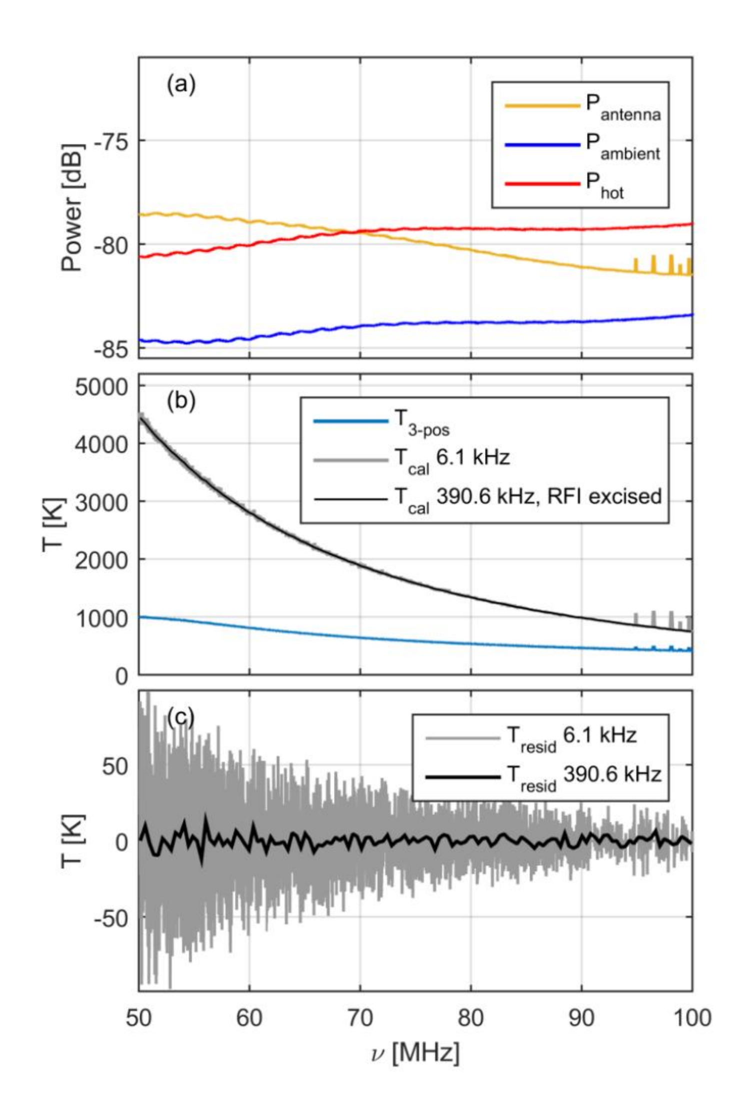


Datos extendidos Figura 4



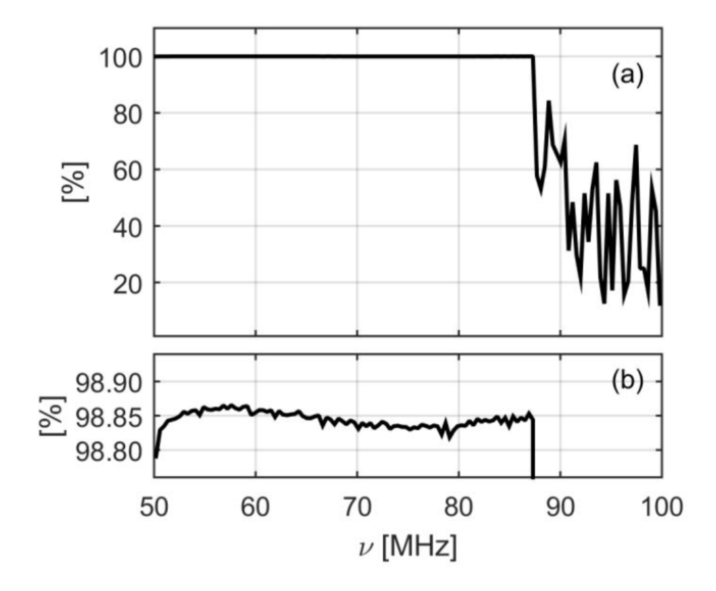
Datos extendidos Figura 5

Machine Translated by Google



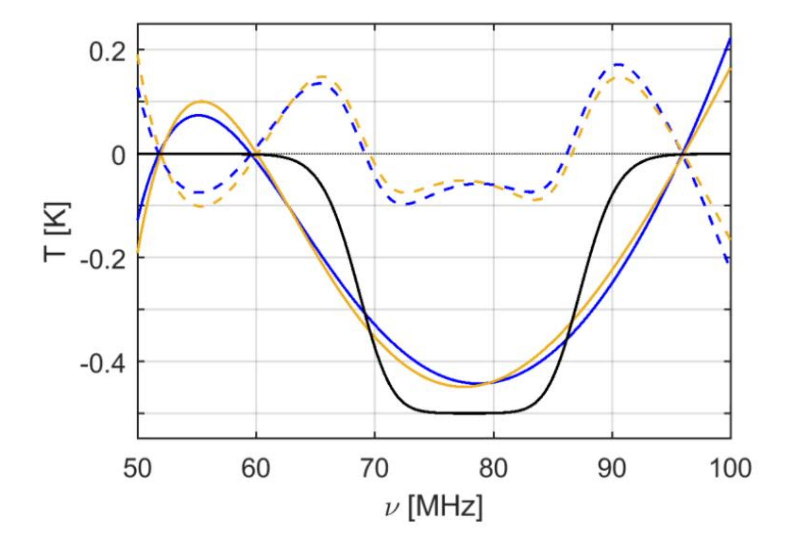
Datos extendidos Figura 6

Machine Translated by Google



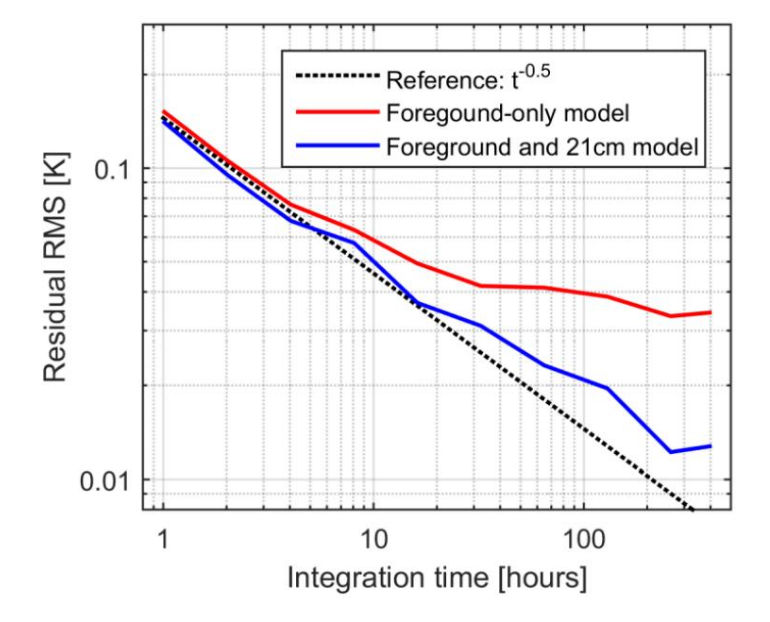
Datos extendidos Figura 7

Machine Translated by Google



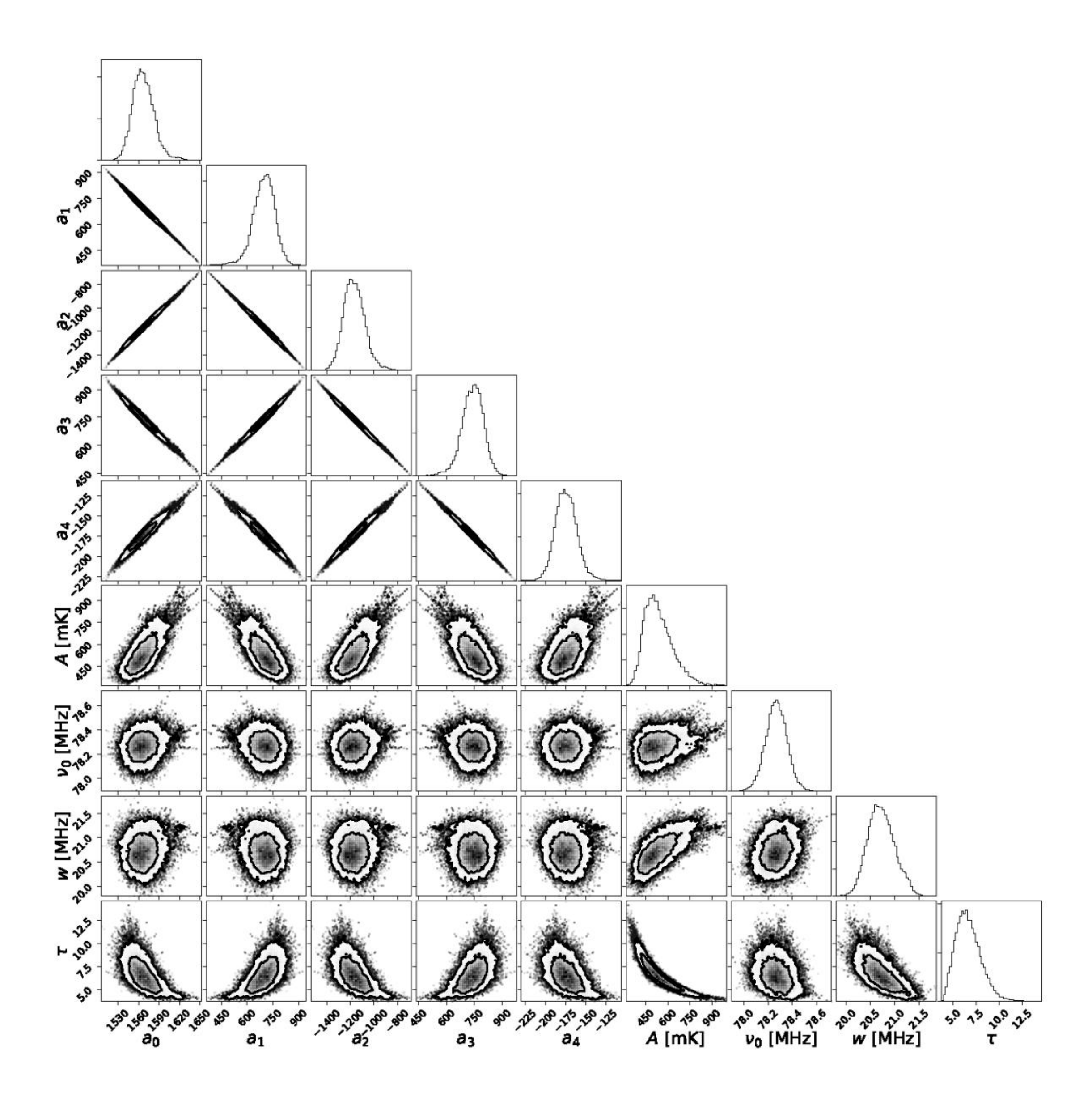
Datos extendidos Figura 8

Machine Translated by Google



Datos extendidos Figura 9

Machine Translated by Google



Datos extendidos Figura 10